

**Т. М. МИРОНОВА, А. В. АШКЕЛЯНЕЦЬ, В. Л. ЧУХЛІБ, А. А. ПЕТРУША**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗМІРНИХ ПАРАМЕТРІВ ЧАВУННИХ ЗАГОТОВОК ТА РЕЖИМІВ ДЕФОРМУВАННЯ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ В ПРОЦЕСІ КУВАННЯ**

Підвищення рівня механічних властивостей сучасних зносостійких чавунів є важливою і актуальною задачею сьогодення. В структурі цих сплавів утворюються складні карбідні евтектики у вигляді суцільної сітки навколо дендритів первинного аустеніту. Застосування обробки тиском сприяє подрібненню карбідної складової та перетворює білий чавун в матеріал з унікальним комплексом властивостей, що поєднує високу стійкість до абразивного зносу з високою стійкістю до ударних навантажень. Обмеження впровадження обробки тиском в промисловості пояснюються їх низькою пластичністю у литому стані. На кафедрі матеріалознавства ім. Тарана Ю.Н. НметАУ розроблено новий клас білих (дактильованих) чавунів з підвищеною пластичністю завдяки карбідним перетворенням в легованому цементиті.

Для прогнозування формозміни в чавунних заготовках застосовано комп'ютерне моделювання у програмному продукті QForm, за допомогою якого визначено, особливості впливу вихідного співвідношення розмірів зразків ( $h/d$ ), ступеня та швидкості деформації ( $\epsilon$ ) на розподіл температури та інтенсивності деформацій при стисканні на різному обладнанні. Для порівняння результатів комп'ютерного моделювання операції осадження із формозміною в заготовках з чавуну, що містить 2,4%С; 3,2%V; 1,78%Cr, проводили гаряче стискання на молоті та на гідравлічному пресі. Отримані результати показують, що по вертикальному перетину зразків деформація відбувається нерівномірно. При збільшенні висоти заготовки структурні складові деформуються в більшій мірі. При куванні на молоті утворюється більш однорідна структура. Правомірність результатів математичного моделювання співпадає з даними експериментальних досліджень, що підтверджує доцільність використання моделювання для прогнозування формозміни при куванні дактильованого чавуну.

Вивчено структурні перетворення в чавунних заготовках, що підлягали куванню в промислових умовах. Найбільш суттєвому подрібненню евтектичного цементиту та структурній однорідності поковок сприяє кування при 1000...1100°C із декількома виносками, застосування проміжного відпалу та деформування при температурах нижчих за температуру рекристалізації цементиту 850... 950 °C.

**Ключові слова:** білий чавун, зносостійкість, пластичність, заготовка, математичне моделювання, осадження, структурні зміни.

**Т. М. МИРОНОВА, А. В. АШКЕЛЯНЕЦЬ, В. Л. ЧУХЛЕБ, А. А. ПЕТРУША**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧУГУННЫХ ЗАГОТОВОК И РЕЖИМОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ В ПРОЦЕССЕ КОВКИ**

Повышение уровня механических свойств современных износостойких чугунов является важной и актуальной задачей современности. В структуре этих сплавов образуются сложные карбидные эвтектики в виде сплошной сетки вокруг дендритов первичного аустенита. Применение обработки давлением способствует измельчению карбидной составляющей и превращает белый чугун в материал с уникальным комплексом свойств, сочетающий высокую стойкость к абразивному износу с высокой ударостойкостью. Трудность внедрения обработки давлением в промышленности объясняется их низкой пластичностью в литом состоянии. На кафедре материаловедения им. Тарана Ю.Н. НметАУ разработан новый класс белых чугунов с повышенной пластичностью благодаря карбидным превращениям в легированных цементите.

Для прогнозирования формоизменения в чугунных заготовках применено компьютерное моделирование в программном продукте QForm, с помощью которого определены особенности влияния исходного соотношения размеров образцов ( $h/d$ ), степени и скорости деформации ( $\epsilon$ ) на распределение температуры и интенсивности деформаций при осадке на разном оборудовании. Для сравнения результатов компьютерного моделированияковки с формоизменениями в заготовках из чугуна, содержащего 2,4% С; 3,2% V; 1,78% Cr, проводили горячую осадку на молоте и на гидравлическом прессе. Полученные результаты показывают, что по высоте образцов деформация происходит неравномерно. При увеличении высоты заготовки структура изменяется в большей степени. При ковке на молоте образуется более однородная структура. Правомерность результатов математического моделирования совпадает с данными экспериментальных исследований, что подтверждает целесообразность использования моделирования для прогнозирования формоизменения при ковке дактильованого чугуна.

Изучены структурные изменения в чугунных заготовках, которые ковали в промышленных условиях. Наиболее существенному измельчению эвтектического цементита и структурной однородности поковок способствует ковка при 1000...1100°C с несколькими выносками, применение промежуточного отжига и окончательной деформации при температурах ниже температуры рекристаллизации цементита 850 ... 950°C.

**Ключевые слова:** белый чугун, износостойкость, пластичность, заготовка, математическое моделирование, осадка, структурные изменения.

**Т. М. MYRONOVA, A. V. ASHKELIANETS, V. L. CHUHLIB, A. A. PETRUSHA**

### **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CAST IRON WORKPIECE SIZE FACTORS AND DEFORMATION MODES AT FORM CHANGES IN THE FORGING PROCESS**

Today the important task is to increase the level of mechanical properties of modern wear-resistant castings. In the structure of these alloys, there are complex carbide eutectics as a continuous grid around dendrites of the primary austenite. Eutectic carbides divide into particles in the process of pressure treatment, the mechanical properties of white cast iron become better, abrasive resistance and impact strength increase as well. The influence of carbide transformations on ductility, hardening and softening processes during deformation when applying different straining methods, as well as the influence of annealing following chipless shaping was determined. The deformation of white cast iron is almost never used in industry, because it has low ductility after casting. New compositions of white low-alloyed cast irons with increased plasticity developed at the Department of Materials Science of the National Metallurgical Academy of Ukraine. It is shown that implementation of phase transitions in metastable carbides could lead to hard deforming materials plasticity increasing in several times as well as to provide their successful pressure treatment under industrial conditions. The QForm program is used for computer simulation of cast iron processes of forging. The ratio of the sample sizes ( $h/d$ ), the degree and the deformation rate ( $\epsilon$ ) affect the distribution of temperature and intensity of deformations when compressed on different equipment. The results of computer simulation coincide with the results of the experiment that was carried out. Cast iron contained 2.4% C; 3.2% V; 1.78% Cr, hot compression was carried out on a hammer and on a hydraulic press.

The results of the experiment indicate that the deformation is uneven in the vertical section of the samples. The structure deforms to a greater extent if the height of the workpiece is greater. A homogeneous structure is formed when forging on a hammer on a vertical cross section of a sample, although the structure changes in the central section of forging more.

Production technologies and deformable cast iron forgings were developed. The microstructural analysis of cast iron blanks, which were subject to forging in industrial conditions, showed that eutectic cementite is crushed by forging in two stages. The first stage is the deformation  $\epsilon = 5 \dots 15\%$  at 1000 ... 1100 °C, after which it is heated and departed, and the second stage (final) at a temperature less than the recrystallization temperature of cementite 850 ... 950 °C.

**Keywords:** white iron, wear resistance, plasticity, workpiece, mathematical modeling, upsetting, structural changes.

**Вступ.** Білі чавуни широко використовуються в сучасній металургії та машинобудуванні як зносостійкі матеріали. Механічні властивості цих гетерофазних сплавів залежать від великого числа факторів. Традиційно їх використовують в якості ливарних сплавів, але давно відомо, що обробка тиском не тільки цілком можлива а й дозволяє суттєво поліпшити механічні властивості таких сплавів. В результаті пластичної деформації їх міцність збільшується в 2-4 рази, ударна в'язкість зростає в 3-6 разів, втомна міцність в 2-2,5 рази. При цьому зберігаються високі показники твердості і зносостійкості [1-3]. В той же час широке застосування деформаційної обробки білих чавунів гальмується низькою пластичністю в литому стані, що обумовлено наявністю крихких евтектичних карбідів. Вченими НМЕТАУ розроблено новий клас білих чавунів, що мають підвищену пластичність за рахунок фазових перетворень в евтектичній складовій. Ці низьколеговані ледебуритні чавуни успішно підлягають обробці тиском та називають дактильованими [1-3]. В зв'язку з цим важливою і актуальною задачею для впровадження виготовлення якісних поковок із білих чавунів є дослідження їх поведінки при різних режимах гарячого осадження.

**Аналіз стану питання.** Сучасні зносостійкі чавуни – це складно леговані багатокомпонентні сплави, при твердінні яких формуються складні карбідні евтектики. Наявність суцільної евтектичної сітки навколо дендритів первинного аустеніту зменшує стійкість деталей при абразивному зношуванні, бо відбувається викришування твердих карбідів під час тертя. Розташування твердих карбідних часток згідно «правила Шарпі», а саме рівномірно розгалужене у металеві матриці, сприяє суттєвому підвищенню зносостійкості виробів. Один з найбільш відомих підходів отримання такої структури, що значно збільшує вартість виробів, є застосування високого легування елементами, які сприяють утворенню різних типів інвертованої евтектики на базі спеціальних карбідів [4, 5]. Більш економічним є застосування пластичного, що перетворює білий чавун в матеріал з унікальним комплексом властивостей, який поєднує високу стійкість до абразивного зносу з високою стійкістю до ударних навантажень. Розробка складів дактильованих чавунів дозволяє деформувати ці сплави на лабораторному і промисловому обладнанні [1]. В основі цього методу лежить використання фазових перетворень, які відбуваються в процесі попередньої теплової обробки в пересиченому евтектичному цементиті. При легуванні білого чавуну елементами такими, як Cr, Mo, W, V, Ti, відбувається їх розчинення в карбіді заліза  $M_3C$ , збільшується рівень його метастабільності, і в цементиті виділяються більш стабільні карбіди. При цьому частина цементиту знеуглецьовується і перетворюється в аустеніт. Найбільш ефективним виявляється вплив ванадію спостерігається фазове перетворення:  $(Fe,V)_3C \rightarrow VC + \text{аустеніт} + Fe_3C$ . Це сприяє порушенню монолітності цементиту в колоніях ледебуриту за рахунок утворення міжфазних меж. Крім того, відбувається структурування цементиту, виникають нові площини ковзання, його

пластичність суттєво підвищується. Здатність карбідів заліза до формозміни без руйнування залежить від температури, напруженого стану, швидкості деформування та інших чинників обробки тиском, що в кінцевому стані визначає структуру та властивості заготовки.

**Метою даної роботи** є дослідження впливу вихідних параметрів та режимів кування на формування структури чавунних поковок, а саме визначення впливу співвідношення розмірів заготовок (висота/діаметр) на структурну неоднорідність та поведінку чавуну при гарячому куванні з різною швидкістю деформування, а також розробити режими деформування чавунних виливків і заготовок для виробництва поковок в промислових умовах

**Результати роботи.** В якості основної ковальської операції для проведення експерименту була вибрана операція «осаджування». Швидкість деформації варіювалась в залежності від вибору обладнання. Використовували пневматичний кувальний молот з МПЧ 50 кг, та гідравлічний кувальний прес з номінальною силою 160тон. Швидкість деформації на молоті досягала 6000 мм/хв., а на пресі – 40 мм/хв.

Науковий інтерес викликає можливість застосування комп'ютерного моделювання для прогнозування формозміни в чавунних заготовках при варіюванні різних параметрів деформування, а саме співвідношення висоти до діаметра зразка ( $h/d$ ), ступеня та швидкості деформації ( $\epsilon$ ), обладнання та інструменту. З цією метою було виконане комп'ютерне моделювання у ліцензійному програмному продукті QForm [6], що поставляється з великою базою даних для матеріалів, що деформуються, а також обладнання та мастил. В якості модельного в програмі було обрано залізобуглецевий сплав з вмістом вуглецю 1,9%, що по своїй структурі й наявності карбідної фази при досліджуваних температурах є гетерофазним сплавом й наближається до експериментальних чавунів, хоча й не містить евтектичного цементиту. Співвідношення висоти до діаметра зразка ( $h/d$ ) дорівнювало 0,25; 0,5; 1,0; 2,0, а ступінь деформації  $\epsilon$  моделювалась 10%, 20% і 30%.

Результати математичного моделювання щодо розподілу температури показали, що у порівнянні з пресом на молоті при всіх ступенях деформації відбувається деформаційний розігрів заготовки під час деформації через велику швидкість деформації, що у свою чергу вказує на більшу інтенсивність деформації на молоті. Під час осадження на пресі відбувається охолодження заготовки в приконтактних зонах з поверхнею інструмента, що пов'язано з постійним контактом поверхні інструменту та поверхні заготовки. Стосовно розмірного фактору зразків, то природно, що зменшення маси зразка призводить до скорішого вистигання.

При моделюванні впливу швидкості деформації та розмірного співвідношення встановлено, що при всіх відомих ступенях осадження більш рівномірний розподіл пластичних деформацій відбувається для зразків з  $h/d > 1$ , а при  $h/d = 2$  спостерігається суттєва неоднорідність, особливо при деформуванні на пресі, а саме: в центральній частині відносно контактних

поверхонь зразків пластичне деформування найбільш інтенсивне (рис.1а). При куванні на молоті більш помітні ділянки інтенсивного деформування біля контактних поверхонь (рис.1б).

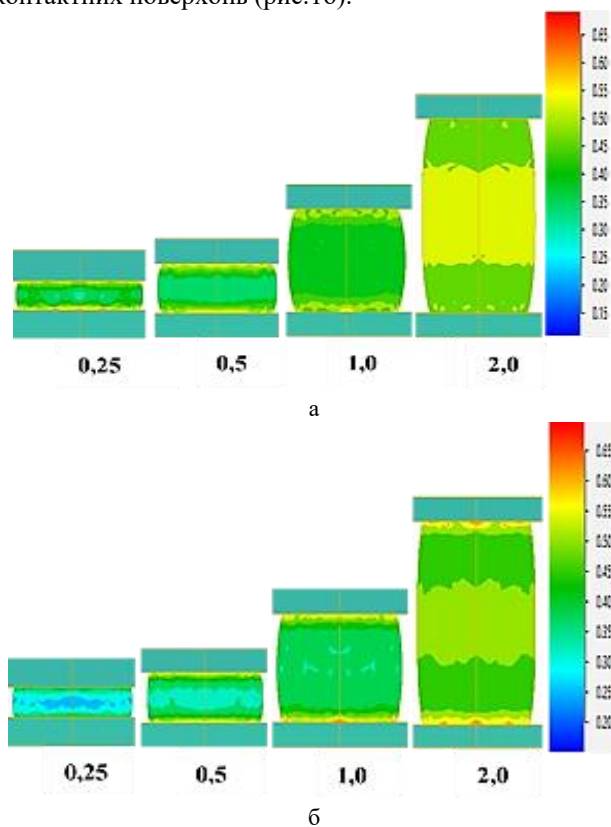


Рис.1 – Розподіл пластичних деформацій при  $\epsilon = 30\%$ : а – на пресі; б – на молоті

У процесі операції осаджування спостерігається «діжкоподібність» заготовки, котра в більшій мірі проявляється на пресі (рис.2). Це пов'язано з тим, що на контактах поверхонь метал переохолоджується, відбувається прилипання, коефіцієнт тертя менший ніж на молоті і тому плин металу по поверхні інструмента ускладнений.

Для порівняння результатів комп'ютерного моделювання операції осадження високо вуглецевого сплаву (1,9%C) із формозміною в заготовках з дактильованого чавуну, що містить 2,4%C; 3,2%V; 1,78%Cr, проводили наступний експеримент: із литих стрижнів діаметром 38мм виготовили заготовки різної висоти:  $h=38\ldots 40$ мм та  $76\ldots 80$ мм. Перед гарячим деформуванням зразки підлягали дворазовому відпалу ( $860^{\circ}\text{C}-3\text{год.}+680^{\circ}\text{C}-4\text{год.}$ ) з метою ініціювання карбідного перетворення в цементиті для підвищення пластичності.

Після термічної обробки зразки нагрівали в печі до  $T=1060^{\circ}\text{C}$ , витримували 30хв., а потім деформували на молоті та на пресі. Кування на молоті проводили з двома виносками для додаткового підігріву зразка після деформування на  $\sim 37\%$ . Сумарний ступінь деформування склав 55% на обох зразках, незалежно від попереднього розміру.

Інші два зразки деформували на пресі із ступенем деформування 50%. Загальний вигляд зразків після деформування на молоті та пресі показаний на рис.2. Після деформування було проведено мікроструктурний аналіз по вертикальному перетину зразків.



Рис.2 – Зразки експериментального чавуну після гарячого деформування

У вихідному стані структура експериментального чавуну складається із дендритів аустеніту та евтектичної складової: ледебуриту та розгалуженої евтектики на базі карбиду ванадію, тобто з «карбідних зерен» – перетин гілок дендритів аустеніту, оточений евтектичною складовою. Під час пластичного деформування ці зерна витягаються в напрямку дії розтягуючої напруги. Структура нагадує строкатість, а по ширині витягнутих зерен можна судити про розподілення ступеню деформування по перерізу зразків.

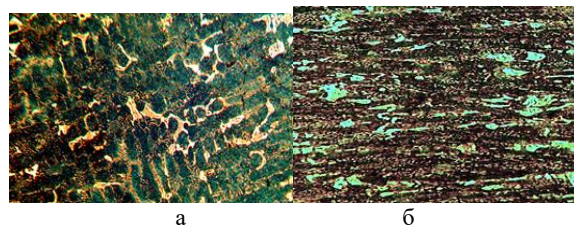


Рис.3– Мікроструктура експериментального чавуну, 100 $\times$ ; а – у вихідному стані; б – після осадження

Мікроструктурний кількісний аналіз виконували наступним чином: ширину (висоту) карбідного зерна визначали за методом січних, причому спочатку визначали вісь вздовж якої були орієнтовані зерна і перпендикулярно проводили січні, крім того визначали кут цієї осі з лінією паралельною поверхні зразка (рис.4). Для визначення ступеню формозмін структури зразків було сфотографовано мікроструктуру при збільшенні 125 $\times$  разів через кожні 2мм (для зразків 38/38) та через кожні 4мм (для зразків 80/40) по вертикальному перетину зразків.

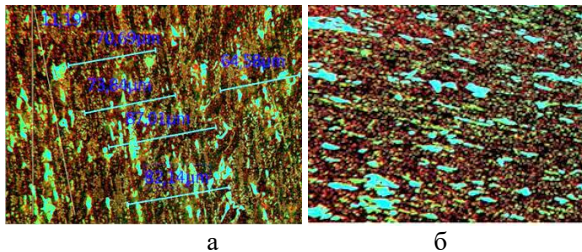
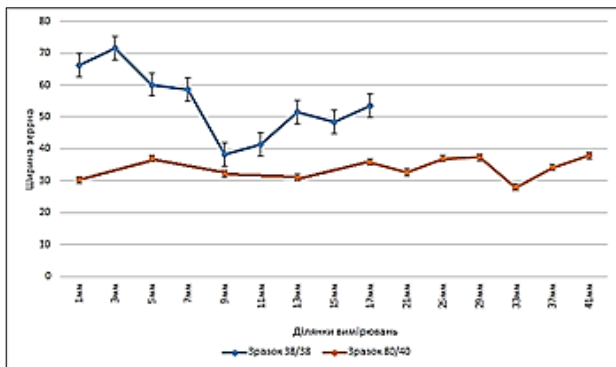
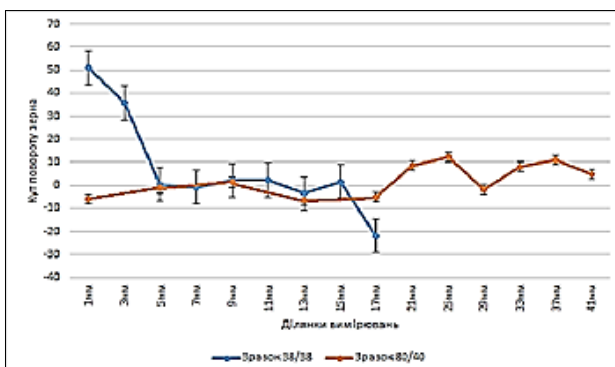


Рис.4 – Визначення розміру ширини карбідних зерен та кута їх орієнтування після стискання: а – на молоті, 125<sup>x</sup>, б – на пресі, 400<sup>x</sup>

Результати кількісного мікроструктурного аналізу графічно показані на рисунку 5. Отримані результати показують, що деформація відбувається по вертикальному перетину зразків нерівномірно. Співвідношення висота/діаметр мають суттєвий вплив на ступінь структурних змін в чавунних зразках при однаковому загальному ступеню деформації. При збільшенні висоти зразка гілки аустеніту деформуються в більший мірі, особливо при осадженні на молоті (рис. 5).



а



б

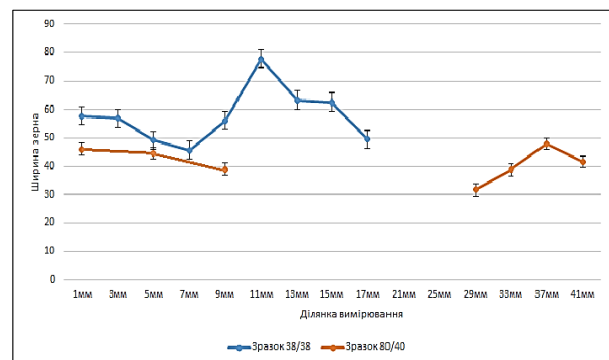
Рис.5 – Результати кількісного мікроструктурного аналізу чавунних зразків, що підлягали куванню на молоті: а – зміна розмірів «карбідного зерна»; б – зміна кута орієнтування зерен

При деформуванні на молоті формується більш однорідна структура, хоча є тенденція до подрібнення структури в центральних ділянках поковок. На цих ділянках зерна витягнуті майже паралельно поверхні

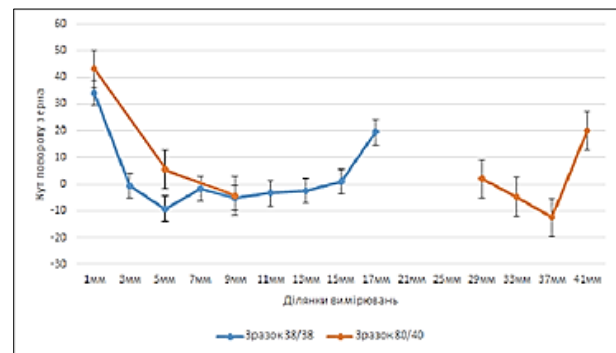
зразка, тобто направленні перпендикулярно діючим зусиллям стискання (рис.3б).

Особливо структурна неоднорідність виявляється при деформуванні на пресі в зразку з висотою в 2 рази більшою за діаметр. В його центральній ділянці евтектичні колонії не тільки витягаються, а й подрібнюються таким чином, що евтектична сітка повністю руйнується (рис.4 б). В зв'язку з цим визначити розмір та орієнтування «карбідних зерен» не можливо. Це показано на графіку розривом лінії (рис. 6).

Таким чином, при куванні на молоті, яке відбувається в декілька етапів заготовки мають більш однорідну структуру по висоті зразка. При збільшенні відношення h/d відбувається більш інтенсивне подрібнення структури.



а



б

Рис.6 – Результати кількісного мікроструктурного аналізу чавунних зразків, що підлягали деформуванню на пресі: а – зміна розмірів «карбідного зерна»; б – зміна кута орієнтування зерен

Для вивчення можливості виробництва поковок з розроблених складів ледебуритних чавунів на ковальсько-пресовому обладнанні в промислових умовах ЗАТ ФЕРИТ (раніше КПУ № 4 заводу ДЗМО) проводили кування на молоті 25 кг і 30 кг виливків на заготовки наступних розмірів: Ø25мм, Ø45мм, Ø30мм і смугу 30×100мм. В умовах заводу «Дніпроспецсталь» проводили гарячу деформацію 200кг виливків, що були виплавлені на Краматорському металургійному заводі. Отримано поковки квадратного перетину 100, а також коло Ø 90 і Ø 50.

Перед деформуванням виливки нагрівали в камерній печі до температури 1100 °C протягом 40...50хв. Температурний інтервал кування 1050 ... 850 °C з проміжним підігрівом (0,5 год).



Для підвищення технологічної пластичності доцільним є проводити кування в два етапи. На першому етапі деформацію здійснюють в інтервалі 5...15%. Після чого необхідно провести проміжний відпал при температурі 1000...1080°C 3 годин. Попередня деформація в значній мірі стимулює і прискорює процес розпаду цементиту на аустеніт і карбіди ванадію в процесі високотемпературної витримки [1]. Як показали дослідження, попередня деформація менш 5% не ефективна, помітних структурних змін в порівнянні з початковим станом чавуну після відпалу не відбувається. Зі збільшенням ступеню деформації збільшується дефектність цементиту і процес його розпаду при наступному нагріванні і витримці активізується. Збільшення ступеня попередньої деформації більше 15% для литої заготовки досить небезпечно, оскільки можуть утворитися поверхневі тріщини, обумовлені також охолодженням чавуну. Після такої обробки проводять остаточну деформацію.

Запропонована схема дозволяє, зберігаючи високу твердість і зносостійкість поковки, значно підвищити пластичність дактильованого чавуну. Слід зазначити, що остаточне кування при температурах, нижчих за температуру рекристалізації цементиту, а саме при 850...950 °C призводить до подрібнення цементиту по утворених висококутових межах на більш дрібні частинки (рис. 7). При цьому вони стають більш рівноосними.

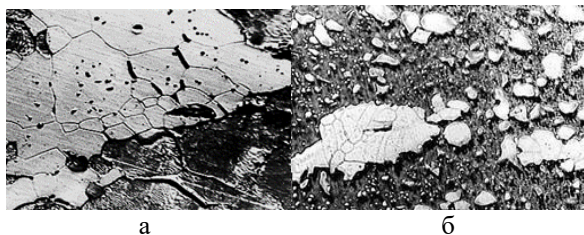


Рис. 7 – Утворення цементиту: а – після рекристалізації; б – отримання більш дрібних частинок цементиту

Якщо в початковому стані розмір евтектичних колоній становив у середньому  $9,07 \times 7,48$  мкм, то після кування –  $6,88 \times 5,33$  мкм відповідно, що на 25% менше.

**Висновки.** Досліджено вплив вихідних параметрів та режимів стискання на формування структури чавунних поковок, а саме визначення впливу співвідношення розмірів заготовок (висота/діаметр) на структурну неоднорідність та поведінку чавуну при гарячому куванні на молоті та гідравлічному пресі.

Результати математичного моделювання співпадають з даними експериментальних досліджень, що підтверджує правомірність і доцільність його використання для прогнозування формозміни при куванні дактильованого чавуну.

Отримані результати показують, що по вертикальному перетину зразків деформація

відбувається нерівномірно. При збільшенні висоти заготовки структурні складові деформуються в більшій мірі. При куванні на молоті утворюється більш однорідна структура по вертикальному перетину зразка, хоча є тенденція до більшого подрібнення структури в центральній ділянці поковки.

При деформуванні на пресі в зразку з висотою в 2 рази більшою за діаметр виявляється суттєва структурна неоднорідність. Причому ступінь подрібнення структури збільшується від краю до центру, а в центральній ділянці евтектична сітка повністю руйнується.

Вивчено структурні перетворення в чавунних заготовках, що підлягали куванню в промислових умовах. Найбільш суттєвому подрібненню евтектичного цементиту та структурній однорідності поковок сприяє кування із декількома виносками, застосування проміжного відпалу та остаточне деформування при температурах нижчих за температуру рекристалізації цементиту.

#### Список літератури

1. Миронова Т.М. Управление формированием структуры в белых ледебуритных чугунах на различных этапах деформационного периода / Т.М. Миронова, М. М. Рябчий // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – №4. – С. 79–81.
2. Миронова, Т. М. О механизмах влияния фазовых переходов на поведение евтектических карбидов при деформировании / Т. М. Миронова, Т. Р. Донская, А. Ю. Сидорова // *Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. : Фізика, Радіоелектроніка*. – Д., 2012. – Т. 20, № 2. – С. 97–104.
3. Миронова, Т. М. Структура и свойства деформируемых чугунов / Т. М. Миронова, В. З. Куцова. – Д. : Дриант, 2009. – 190 с.
4. Таран-Жовнир Ю.Н. Строение эвтектик и создание новых сплавов эвтектического типа. / Ю.Н. Таран-Жовнир // *Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя* – Київ, 1998 р. – С. 176–197.
5. Сильман Г.И. Белые легированные чугуны с композиционной структурой. / Г.И.Сильман // *МіТОМ: М.*-2005. – №7.– С.94–100.
6. <http://www.qform3d.ru/products/qform>

#### References (transliterated)

1. Mironova T.M., Ryabchij M. M Upravleniye formirovaniem struktury v belyh ledeburitnyh chugunah na razlichnykh etapah deformatsionnogo perioda [Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost']. – 2008. – No 4. – pp. 79–81.
2. Myronova T.M., Donskaya T.R., Sidorova A.Yu. O mekhanizмах vliyaniya fazovykh perekhodov na povedeniye evtekticheskikh karbidov pri deformirovani [On the influence mechanisms of the phase transitions to the behavior of eutectic carbides during deformation]. Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Seriya: Fizyka, Radioelektronika [Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series: Physics, Electronics], 2012, vol. 20, No. 2, pp. 970–104.
3. Myronova T.M., Kutsova V.Z. Struktura i svoystva deformiruyemykh chugunov [Structure and properties of the deformed cast irons]. Dnipropetrovsk, Driant Publ., 2009. – 190 p.
4. Taran-Zhovnir YU.N. Stroenie ehvtektik i sozdanie novykh spлавov ehvtekticheskogo tipa. [Suchasne materialoznavstvo HKH storichya] – Kiev, 1998. – pp. 176–197.
5. Sil'man G.I. Belye legirovannye chuguny s kompozicionnoy strukturoj. [MiTOM]: Moscow. -2005. – No 7.– pp.94–100.
6. . <http://www.qform3d.ru/products/qform>

**Миронова Тетяна Михайлівна (МироноваТатьяна Михайловна, MyronovaTetiana M.)** – доктор технічних наук, професор кафедри матеріалознавства ім. акад. Ю.М.Тарана-Жовніра, Національна металургійна академія України, e-mail: t.myronova.myh@gmail.com .

**Ашкелянець Антон Володимирович (Ашкелянец Антон Владимирович, Ashkelianets Anton V.)** – кандидат технічних наук, доцент, Національна металургійна академія України, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О. П. Чекмарьова, e-mail: ashkelyanets@metal-forming.org.

**Чухліб Віталій Леонідович (Чухлеб Виталий Леонидович, Chuhlib Vitaliy L.)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри обробки металів тиском, e-mail: chuhleb@metal-forming.org.

**Петруша Анастасія Андріївна (Петруша Анастасия Андреевна, Petruscha Anastasiya A)** – аспірант кафедри матеріалознавства ім. акад. Ю.Н.Тарана-Жовнира, e-mail: petruscha1994@gmail.com .